

# ISÓTOPOS DE ESTRONCIO EN CALCÁREOS DEL NORESTE PATAGÓNICO: RESULTADOS PRELIMINARES

Ricardo VARELA<sup>1\*</sup>, Pablo D. GONZÁLEZ<sup>2</sup>, Ruy PHILIPP<sup>3</sup>, Ana María SATO<sup>1</sup>, Santiago GONZÁLEZ<sup>2</sup>, Gerson GRECO<sup>2</sup> y Maximiliano NAIPAUER<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones Geológicas, Universidad Nacional de La Plata - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, La Plata. E-mail: ricardovarela47@yahoo.com.ar, sato@cig.museo.unlp.edu.ar

<sup>2</sup> Instituto de Investigación en Paleobiología y Geología, Universidad Nacional de Río Negro, General Roca. E-mail: pdgonzalez@unrn.edu.ar, sgonzalez@unrn.edu.ar, gersongreco@gmail.com

<sup>3</sup> Instituto de Geociências, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Canoas. E-mail: ruy.philipp@ufrgs.br

<sup>4</sup> Instituto de Estudios Andinos, Universidad de Buenos Aires - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Ciudad Autónoma de Buenos Aires. E-mail: maxinaipauer@gl.fcen.uba.ar

## RESUMEN

Se estudió la composición isotópica de estroncio de rocas calcáreas de unidades del noreste patagónico. Incluye: a) Mármoles de Pailemán (de dudosa pertenencia a la Formación El Jagüelito), valor medio de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$   $0,707354 \pm 0,000113$ ; b) mármoles de estancia La Auriciana (Complejo Mina Gonzalito), valor medio de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$   $0,708730 \pm 0,000285$ ; c) clastos de calizas con arqueociátidos de un metaconglomerado de la Formación El Jagüelito en las proximidades de Sierra Grande, valor medio de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$   $0,710605 \pm 0,000118$ . El cotejo con la curva estándar de variación de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en los mares en función del tiempo, ubica con mayor antigüedad a los mármoles de Pailemán (ca. 625 Ma), con una edad de ca. 550-510 Ma a los mármoles de estancia La Auriciana y en el Cámbrico a las calizas de los clastos del metaconglomerado de Sierra Grande.

**Palabras clave:** *Formación El Jagüelito, Complejo Mina Gonzalito, quimioestratigrafía,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$*

## ABSTRACT

*Strontium isotopic composition from Northeast Patagonia: Preliminary results*

We have carried out measurements of strontium isotopic compositions of carbonate units from northeastern Patagonia. The rock units included in the study are: a) Pailemán marble, with questionable belonging to El Jagüelito Formation, and mean  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  value of  $0.707354 \pm 0.000113$ ; b) marbles from estancia La Auriciana, Mina Gonzalito Complex, with mean  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  value of  $0.708730 \pm 0.000285$ ; c) archaeocyathan limestone clasts from a metaconglomerate layer of El Jagüelito Formation in the Sierra Grande area, with mean  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  value of  $0.710605 \pm 0.000118$ . Comparison of these data with the global  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  evolution curve suggests that the Pailemán marble is the oldest (ca. 625 Ma), followed by the estancia La Auriciana marbles (ca. 550-510 Ma), while the archaeocyathan limestone clasts from Sierra Grande area are Cambrian.

**Keywords:** *El Jagüelito Formation, Mina Gonzalito Formation, chemostratigraphy,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$*

## INTRODUCCIÓN

El estudio del basamento cristalino del norte patagónico tuvo numerosas e importantes contribuciones durante el siglo XX, inherentes a su distribución regional, composición, deformación y metamorfismo, distinción de unidades estratigráficas y relaciones entre ellas y la cobertura volcano-sedimentaria suprayacente (Caminos y Llambías 1984 y referencias allí citadas).

La cronología relativa permitió asegurar una edad pre-silúrica para algunas unidades del basamento de la región orien-

tal, criterio que no pudo ser aplicado en las regiones centro-occidental extra-andina y cordillerana, donde la cobertura volcano-sedimentaria más antigua por su contenido fosilífero es del Triásico Medio-Superior (Formación Los Menucos y equivalentes).

En el último cuarto de siglo pasado, la obtención de numerosas edades isotópicas por los métodos expeditivos K-Ar y Rb-Sr fue aclarando en general la ubicación cronoestratigráfica de las unidades de basamento, aunque hubo dificultades con aquellas afectadas por mayor grado de deformación y metamorfismo. Recién a fi-

nes de siglo XX y entrada del siglo XXI, el uso de la metodología U-Pb, especialmente en circones, permitió conocer y/o corregir la edad geológica de unidades de basamento de las regiones centro-occidental y cordillerana. Paralelamente, los datos obtenidos por los métodos Sm-Nd y Lu-Hf, aportaron información sobre los tiempos de extracción mantélica, procedencia de magmas y lapsos de residencia cortical.

En rocas metamórficas de protolitos sedimentarios clásticos de la comarca considerada, hay una incipiente utilización del estudio y datación U-Pb de circones detri-

ticos, que ha permitido en algunas unidades fijar límites de mayor antigüedad posible, hacer alguna interpretación de las áreas de proveniencia de sedimentos y determinar patrones de las modas de edad de circones.

La participación de protolitos sedimentarios calcáreos en el basamento de la comarca es modesta, y puede ser el motivo de que todavía no se haya aplicado la quimioestratigrafía, incluyendo esencialmente isótopos de estroncio y de carbono. Para el presente estudio se determinaron relaciones isotópicas  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en rocas calcáreas del Macizo Norpatagónico oriental. Se trata de los mármoles de Pailemán y Mina Gonzalito, y de calizas pertenecientes a clastos de un metaconglomerado cercano a Sierra Grande. En cada caso se comunica el valor medio determinado para la composición isotópica de estroncio, se compara con la curva global de evolución de dichos isótopos en el agua de mar y se obtiene una probable edad de sedimentación.

El carácter preliminar de esta comunicación deriva de la existencia de algunos afloramientos conocidos, no estudiados todavía, que pueden agregarse en futuros estudios y a la posibilidad de mejorar la interpretación de los datos aquí ofrecidos mediante la obtención de composiciones isotópicas de carbono y oxígeno.

## MARCO GEOLÓGICO

De acuerdo con el conocimiento actual, se considera que las unidades de basamento cristalino del norte patagónico son aquellas formadas por rocas ígneo-metamórficas de mayor antigüedad que Triásico Medio (Varela *et al.* 2005). Los afloramientos, comprobados entre las latitudes aproximadas de 39° y 43° S, son discontinuos y se extienden en las provincias geológicas de la Cordillera Norpatagónica y el Macizo Norpatagónico. Según las edades obtenidas por Basei *et al.* (2002), Varela *et al.* (2005, 2008, 2011) y Pankhurst *et al.* (2006) y la división propuesta por Basei *et al.* (2005) se distinguen tres regiones: i) Cordillera Norpatagónica: Al norte del río Limay que incluye relictos de una se-

cuencia metasedimentaria, entre rocas plutónicas foliadas. Estas últimas tienen edades U-Pb en circón variables entre 420 y 380 Ma. El ambiente tectónico fue relacionado a la evolución de un arco magmático asociado a la fase Chánica del ciclo Famatiniano. ii) Macizo Norpatagónico centro-oeste: Los componentes de mayor antigüedad comprobada incluyen rocas ígneas deformadas con edades U-Pb en circón de 300-280 Ma y escasas meta-sedimentitas. Constituyen el encajonante de granitoides no deformados, de edades U-Pb en circón de 270-250 Ma. El ambiente tectónico se relaciona a la evolución de un arco magmático desarrollado durante el ciclo Gondwánico. iii) Macizo Norpatagónico Atlántico: al este de 66°30' O, contiene a las rocas más antiguas de la comarca, de alto grado metamórfico con granitos de anatexis del Complejo Mina Gonzalito y los granitos Tapera y María Teresa (Ramos 1975, Giacosa 1987), el granito Valcheta (González 2009) y un ortogneis intercalado en el Complejo Mina Gonzalito (Varela *et al.* 2011). También incluye las rocas metamórficas de bajo grado de las formaciones Nahuel Niyeu (Caminos y Llambías 1984) y El Jagüelito (Ramos 1975), que están intruidas por los plutones posttectónicos del Complejo Plutónico Punta Sierra (Busteros *et al.* 1998). En la Formación El Jagüelito se conocen icnofósiles que acotan la máxima antigüedad a la era Paleozoica (González *et al.* 2001) y los clastos calcáreos de un metaconglomerado conteniendo arqueociátidos hacen lo propio al Cámbrico temprano medio (González *et al.* 2011a).

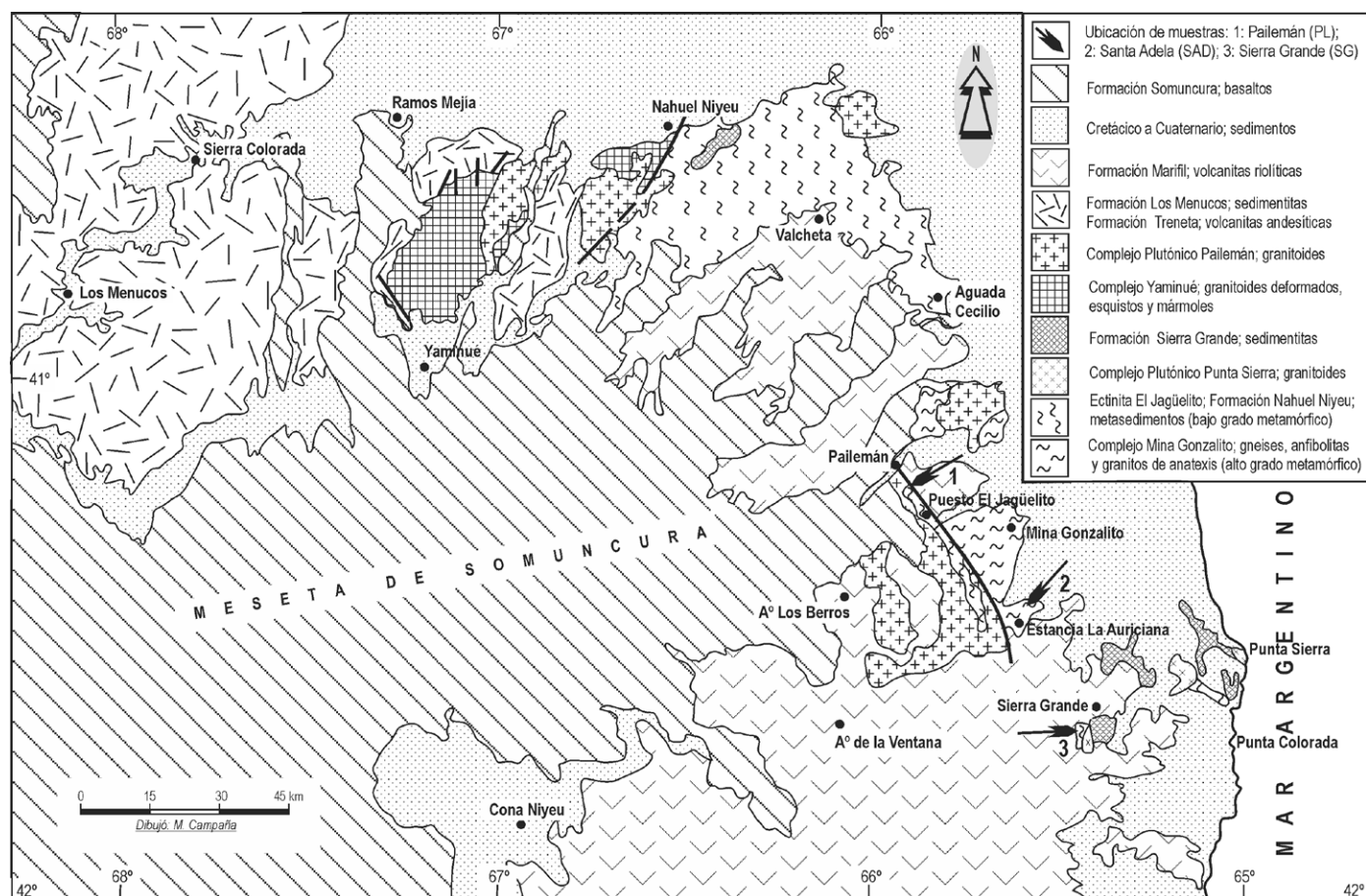
La edad máxima de las meta-sedimentitas de la región queda limitada por la edad U-Pb de las modas de menor edad de circones detríticos, que resultan de ~535-540 Ma en el Complejo Mina Gonzalito, ~535 Ma y ~523 Ma en la Formación El Jagüelito y ~515 Ma en la Formación Nahuel Niyeu (Pankhurst *et al.* 2006, Naipauer *et al.* 2010). La mayor edad U-Pb en circón obtenida de un ortogneis pre-orogénico intrusivo en el Complejo Mina Gonzalito es de  $492 \pm 6$  Ma (Varela *et al.* 2011). El pico metamórfico en facies anfibolita del Complejo Mina Gonzalito se ubi-

ca a  $472 \pm 5$  Ma, de acuerdo con la edad U-Pb de anillos de crecimiento metamórfico en circones de un paragneis cuarzo-feldespático (Pankhurst *et al.* 2006, Greco *et al.* 2014). Precisas edades U-Pb de los plutones intruidos en la Formación El Jagüelito están en el entorno 462-476 Ma (Pankhurst *et al.* 2006, Varela *et al.* 2008, González *et al.* 2008a).

De acuerdo con lo anterior, la sedimentación es de probable edad neoproterozoica (Ediacárico) a Cámbrico temprano y el magmatismo y tectonismo quedan acotados entre 490 y 470 Ma (Cámbrico Tardío-Ordovícico Temprano).

Las rocas estudiadas para la presente contribución pertenecen a unidades del Macizo Norpatagónico oriental o Atlántico. En el mapa geológico 1:250.000 del Servicio Geológico Minero Argentino (Busteros *et al.* 1998), han sido asignadas al Complejo Mina Gonzalito y a la Formación El Jagüelito. La ubicación de las localidades estudiadas se aprecia en el mapa de la figura 1. Se conocen otros afloramientos con rocas calcáreas, no estudiados en ésta contribución, como los del paraje El Tembrao (Sesana 1974, en Dalla Salda *et al.* 2003), puesto El Durazno de arroyo Los Berros (Rosenman 1972) y rincón de Yaminué (Chernicoff y Caminos 1996).

Es conocido que no puede establecerse la relación estratigráfica original del Complejo Mina Gonzalito con otras unidades de basamento, ya que el contacto con la Formación El Jagüelito es tectónico, a través de la zona de cizalla El Jagüelito (Ramos 1975, Giacosa 2001). Los afloramientos calcáreos del Complejo Mina Gonzalito aquí estudiados se sitúan a unos 3 km al este de la estancia La Auriciana, próximos al curso del arroyo Salado ( $41^{\circ}27'04,3''\text{S}$ - $65^{\circ}38'44,2''\text{O}$ ). Fueron caracterizados química y estructuralmente por Dalla Salda *et al.* (2003). El banco calcáreo tiene un espesor de aproximadamente 30 m y es concordante con esquistos, paragneises y anfibolitas. Hacia el norte, desaparecen los calcáreos y el complejo se integra con esquistos, gneises, anfibolitas y varias generaciones de diques y vetas mineralizadas. El banco calcáreo es mayormente calco-silicático, con dos ni-



**Figura 1:** Bosquejo geológico del sector centro-oriental del Macizo Norpatagónico (modificado de González 1994).

veles dolomíticos de alta pureza y un decrecimiento de componentes terrígenos hacia la parte superior. El metamorfismo alcanzó la facies anfíbolita granatífera y de acuerdo con los datos químicos se considera que no fue modificada mayormente la composición del protolito.

La caliza o mármol Paillemán ( $41^{\circ}10'19,8''\text{S}$ - $65^{\circ}56'50,8''\text{O}$ ; Busteros *et al.* 1998, p.59-60) es incluida dentro de la Formación El Jagüelito. Sin embargo, tiene notables diferencias de composición y grado metamórfico respecto de las rocas de esta formación en su sección tipo del puesto El Jagüelito (Ramos 1975) o en aquellas del arroyo Salado (Giacosa y Paredes 2001). En efecto, en estas dos localidades aún no se han hallado mármoles -con excepción de los clastos calcáreos en un meta-conglomerado (González *et al.* 2011a)- y son meta-grauvacas y meta-pelitas, con algunos niveles de meta-areniscas cuarzosas, afectados por metamorfismo en fa-

cies esquistos verde grado clorita y biotita. Subsisten claramente estructuras primarias, entre ellas estratificación, laminación de variados tipos y calcos en la base de estratos, apenas oscurecidos por los planos de clivaje de plano axial relacionados con el apretado plegamiento de la sucesión. Por la otra parte, en Paillemán, es conspicua la presencia de mármoles alternando con esquistos y paragneises de mayor grado metamórfico respecto de las rocas antes descriptas. Dadas la litología que intercala mármoles y el grado metamórfico en facies anfíbolita, la caliza o mármol Paillemán podría constituir una nueva sección estratigráfica del Complejo Mina Gonzalito, o en forma alternativa también podría tratarse de una nueva unidad litoestratigráfica separada del complejo.

De los afloramientos de la Formación El Jagüelito próximos a Sierra Grande, la roca que contiene a los calcáreos estudiados es un meta-conglomerado ( $41^{\circ}39'00''\text{S}$ -

$65^{\circ}25'14,6''\text{O}$ ) que está intercalado entre filitas y meta-grauvacas con metamorfismo regional en facies esquistos verde grado clorita (González *et al.* 2011a). El material analizado proviene de clastos de caliza contenidos en el meta-conglomerado, que se destaca por ser portadores de arqueociátidos de edad Cámbrico temprano medio (González *et al.* 2011a, 2013).

## METODOLOGÍA

### Muestreo

En la cantera Santa Adela de la estancia La Auriciana se practicó un muestreo transversal al rumbo ( $\text{N}310^{\circ}/46^{\circ}\text{E}$ ) del bandeamiento composicional de los mármoles. Se tomaron muestras cada 1-2 m, en total 15 (SAD-1 a SAD-15), en orden ascendente teniendo en cuenta la inclinación del bandeamiento, desde el sudoeste hacia el noreste a lo largo del frente de cantera. Por otro lado, en los afloramientos

**CUADRO 1.** Análisis químicos de elementos mayoritarios, Rb, Sr y Ba.

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	LOI	Rb	Sr	Ba
PL-1	0,65	0,09	55,67	0,24	0,07	0,04	<0,01	0,02	0,10	<0,01	42,7	2,2	3102	58
PL-2	0,99	0,12	54,74	0,30	0,11	0,03	0,02	0,06	0,08	<0,01	43,2	1,5	2920	34
PL-3	1,66	0,11	54,81	0,31	0,07	0,04	<0,01	0,06	0,09	<0,01	42,5	2,5	2693	55
PL-4	1,10	0,20	54,12	0,45	0,15	0,06	<0,01	0,04	0,08	0,01	43,4	2,4	2572	52
PL-5	0,42	0,10	56,05	0,13	0,09	0,04	<0,01	0,01	0,07	<0,01	42,7	2,4	3040	33
PL-6	0,70	0,06	55,39	0,19	0,12	0,02	<0,01	0,01	0,11	<0,01	43,1	1,3	2585	41
PL-7	0,42	0,18	55,91	0,12	0,21	0,05	<0,01	0,03	0,09	0,01	42,7	2,6	2245	21
SAD-2	1,29	0,10	31,11	20,97	0,29	0,03	0,01	<0,01	0,02	<0,01	45,7	1,5	119	15
SAD-3	0,71	0,08	31,11	21,06	0,17	0,01	0,01	0,01	<0,01	<0,01	46,4	0,5	104	6
SAD-4	2,70	0,15	30,91	20,81	0,20	0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	44,8	1,7	110	20
SAD-5	0,77	0,05	30,86	21,46	0,15	0,03	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	46,3	1,0	84	6
SAD-6	2,06	0,05	31,22	20,64	0,17	0,03	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	45,4	0,8	84	7
SAD-7	4,14	0,21	30,07	20,93	0,22	0,11	0,02	<0,01	0,02	0,01	43,9	3,8	119	92
SAD-8	2,49	0,06	30,71	21,17	0,15	0,01	0,01	<0,01	0,02	<0,01	45,0	0,2	92	70
SAD-9	1,22	0,14	31,04	21,48	0,24	0,02	0,01	0,01	<0,01	<0,01	45,4	0,9	93	13
SAD-10	1,40	0,08	31,04	21,39	0,27	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	45,4	0,8	89	16
SAD-11	3,16	0,13	30,74	20,93	0,19	0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	44,4	0,3	96	6
SAD-12	1,72	0,14	30,95	20,90	0,20	0,02	0,01	0,01	0,02	<0,01	45,6	0,5	110	16
SAD-13	2,15	0,03	30,62	20,90	0,15	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	45,8	<0,1	108	6
SAD-14	4,45	0,15	30,45	20,59	0,22	0,04	0,01	<0,01	0,01	<0,01	43,7	0,6	108	36
SAD-15	2,84	0,27	30,79	20,59	0,32	0,06	0,01	0,01	<0,01	0,01	44,7	1,7	101	29
SG2009-1A	4,21	0,69	51,24	1,31	0,31	0,13	0,17	0,17	0,03	0,03	41,6	5,8	551	20
SG2009-1B	3,11	0,40	53,13	0,66	0,24	0,03	0,11	0,23	0,07	0,02	41,9	1,3	738	17
SG2009-2	3,47	0,52	52,14	0,91	0,29	0,05	0,21	0,44	0,05	0,01	41,8	2,2	641	30
SG2009-3	3,79	0,16	52,69	1,00	0,16	0,03	0,02	0,19	0,03	<0,01	41,8	1,1	828	17

Realizados en *Acme Analytical Laboratories Ltd.*, por el método 4A-4B (<http://acmelab.com/services/>). Los elementos mayoritarios están expresados en % en peso del óxido, así como el Rb, Sr y Ba están en partes por millón (ppm).

tos de Pailemán el muestreo también fue transversal al rumbo del bandeamiento (N330°/40°E), en un recorrido de dirección OSO-ENE de aproximadamente 200 m donde alternan mármoles y esquistos, pudiendo extraerse siete muestras (PL-1 a PL-7). Finalmente, en cuanto a los clastos de caliza del meta-conglomerado, solamente se dispuso de cuatro muestras, provenientes de tres clastos.

#### Preparación de muestras

Todas las muestras fueron trituradas (fragmentos de 1-2 cm) y depuradas (*“hand-picking”*) para eliminar bordes meteorizados y láminas tectonizadas de espesor aproximado de 1 mm. El material seleccionado fue reducido en recipiente de widia y pasado por tamiz malla 60 (250 µm).

#### Difracción de rayos X (DRX)

La composición mineralógica de los mármoles fue determinada por difracción de rayos X, en el laboratorio de rayos X del Centro de Investigaciones Geológicas (CIG), y también por microscopía óptica.

En especial, los análisis de DRX resultaron de utilidad para identificar las distintas especies de carbonatos y algunos argilominerales, que resultaron difíciles de reconocer bajo el microscopio petrográfico. En todos los casos, es dominante la presencia de carbonatos con pequeñas cantidades de cuarzo. Las muestras de la cantera Santa Adela (SAD-1 a SAD-15) son de composición dolomítica y solo tres tienen calcita en cantidad próxima a 3 % del total (SAD-6, SAD-11 y SAD-15). Las muestras de Pailemán son predominantemente calcíticas. También son calcíticos los clastos de calizas del meta-conglomerado de la Formación El Jagüelito.

#### Láminas delgadas

Se confeccionaron 26 láminas delgadas, una por cada muestra analizada por DRX, isotopía o geoquímica, en el Taller de Cortes Delgados del Centro de Investigaciones Geológicas (CIG). Se efectuó el análisis mineralógico-textural y composicional de las láminas y se tomaron fotomicrografías bajo un microscopio petro-

gráfico NIKON Eclipse E 200 binocular, de luz polarizada y transmitida, con nicols paralelos y cruzados, dos oculares CF/10x/20 y objetivos de 4x/0.10, 10x/0.25, 40x/0.65 y 60x/0.80 perteneciente al Instituto de Investigación en Paleobiología y Geología (IIPG), Universidad Nacional de Río Negro (UNRN). Las fotomicrografías fueron adquiridas con un equipo de cámara y video digital 319 CU (3.2M) CMOS *Microscopy Camera*, adosado al tubo central del microscopio y conectado *on-line* a un sistema de *hardware* y *software*. El proceso de digitalización de las fotomicrografías se llevó a cabo con el *software* *Micrometrics® SE Premium 4* asociado al equipo, y también del IIPG-UNRN.

#### Análisis químicos

Los análisis fueron efectuados por *Acme Laboratories Ltd.*, según el paquete 4A-4B. Incluye la determinación, sobre roca total, de 11 óxidos de elementos mayoritarios (%) y elementos minoritarios y trazas (ppm) por espectrometría de masa con fuente de acoplamiento inductivo tradi-



cional y multiespectral (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*, ICP e ICP-MS). Los resultados obtenidos constan en el cuadro 1.

### Extracción de estroncio

En el laboratorio intermediario Rb-Sr del CIG se procedió a la disolución de las muestras y a la concentración de Sr en columnas cromatográficas. El gabinete de trabajo es presurizado por equipo de Flujo Laminar CASIBA con filtro absoluto EU-13 de 99,99 % de eficiencia. La resina utilizada es Dowex 50W-X8 200-400. Los reactivos incluyeron agua desmineralizada por ósmosis inversa (*Silicon 5/240BTD*), luego bi-distilada sobre cuarzo (*Heraeus Destamat*) y ácidos clorhídrico y nítrico grado analítico destilados "sub-boiling" sobre cuarzo (*Heraeus Herastat*).

Las muestras predominantemente dolomíticas (SAD-1 a SAD-15, ver petrografía abajo), aproximadamente 100 mg, fueron disueltas en recipientes de teflón (*Savillex*), con aproximadamente 5 ml de HCl 2,5 N, en caliente por 24 horas.

Las muestras calcíticas (PL-1 a PL-7, SG-2009-1A, 1B, 2 y 3) y dolomítico-calcíticas (SAD-6, SAD-11 y SAD-15), aproximadamente 100 mg, fueron disueltas en recipientes de teflón (*Savillex*), con aproximadamente 5 ml de HCl 0,5 N, en frío por 5 minutos y de inmediato centrifugadas e introducidas a las columnas de intercambio catiónico.

De lo anterior se desprende que en todas las muestras predominantemente dolomíticas se ha efectuado análisis de isótopos de estroncio en dolomita y en tres de ellas análisis de isótopos de estroncio en calcita.

Las condiciones operativas del laboratorio intermediario del CIG, incluyendo reactivos y medio ambiente, se monitorean rutinariamente con una muestra intra-laboratorio (S-10) del Centro de Pesquisas Geocronológicas (CPGeo), Universidad de San Pablo, Brasil. S-10 es un granito que contiene 320 ppm de rubidio y 13,5 ppm de estroncio, en el que el alto valor de la relación isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  por aporte de estroncio radiogénico, es muy sensible

a la contaminación por estroncio proveniente de los reactivos y medio ambiente. Valores de la relación  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  superiores a 1,2800 son satisfactorios. Durante los ensayos realizados el valor obtenido para S-10 fue de  $1,290770 \pm 0,000047$  y asegura la calidad en la preparación de las muestras.

### Espectrometría de masas

Las relaciones isotópicas  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  provienen de un espectrómetro de ionización termal (TIMS, multicollector) Finnigan Mat 262, del Centro de Pesquisas Geocronológicas, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Brasil. Las relaciones  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  fueron normalizadas para un valor  $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0,1194$  y el valor medio obtenido para la relación  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  del patrón NBS-987 durante el análisis isotópico de estas muestras fue de  $0,710256 \pm 0,000063$ .

## RESULTADOS

### Petrografía y difracción de rayos X

*Complejo Mina Gonzalito de la cantera Santa Adela:* Aquí la sucesión calcárea del Complejo Mina Gonzalito tiene un espesor considerable, de aproximadamente 30 m. Se compone de una alternancia de bancos de mármoles y una sola intercalación de esquisto de 35 cm de espesor. Los mármoles son blancos a blanco-grisáceos, de grano fino a medio variable entre 1 y 2 mm y están finamente bandeados o laminados. Las bandas tienen 1 a 3 mm de ancho e internamente exhiben textura granoblástica irregular a poligonal. La actitud del bandeo composicional  $S_0$  entre el esquisto y el mármol es de rumbo N 310° e inclinación de 46° al este y tiene pequeño ángulo respecto a los planos de esquistosidad  $S_1$ , con rumbo N 290° e inclinación de 57° al este.

Las determinaciones por DRX indican que los mármoles son esencialmente dolomíticos, con muy poca participación de calcita (SAD-6, 11 y 15), y en ocasiones trazas de siderita (SAD-7 y 8). Al microscopio, la dolomita es castaño amarillenta, de alto relieve, acentuado por una oxidación castaño oscura a rojiza. La asocia-

ción mineral de los mármoles se completa con talco + tremolita-actinolita  $\pm$  flogopita. Como minerales accesorios aparecen magnetita (SAD-1) o pirita (SAD-5), además de materia orgánica en casi todas las muestras. El talco se exhibe con varios hábitos, ya sea escamoso y fibroso, así como también pulverulento. Está reemplazado por tremolita-actinolita, que es de hábito prismático largo a fibroso y grano grueso, tanto a partir de los bordes como en forma pseudomórfica. Sólo el mármol SAD-12 exhibe brucita de hábito fibroso, que es pseudomórfica de un mineral equidimensional, de sección cuadrada a rectangular de aristas romas y que posiblemente fuera diópsido.

Las variedades bandeadas de mármoles, intercalan bandas de dolomita y de talco + tremolita-actinolita + materia orgánica + argilominerales secundarios (principalmente illita según DRX). La materia orgánica exhibe un hábito granular de individuos redondeados, agrupados formando racimos o con forma arborescente y aun no se ha transformado en grafito. En síntesis, la asociación mineral metamórfica de los mármoles de Santa Adela es dolomita + talco + tremolita-actinolita  $\pm$  calcita  $\pm$  flogopita. Posiblemente también el diópsido participa de la asociación pero está retrogradado a brucita.

*Caliza o mármol Pailemán:* El cuerpo calcáreo de esta localidad es esencialmente calcítico (sólo con escasa participación de dolomita en PL-5) y está intercalado entre esquistos y paragneises cuarzo-biotíticos, esquistos biotítico-granatíferos y esquistos calcosilicáticos. Los bancos de mármoles exhiben hasta 10 metros de espesor y el rumbo e inclinación de las capas es N 330°/40°E.

Los mármoles son blancos, blanco-grisáceos y grises, con grano medio de ~1,5 mm y están finamente bandeados o laminados. El bandeamiento está definido por la alternancia de bandas calcíticas y de bandas de este mismo carbonato + materia orgánica. Internamente las bandas/láminas exhiben textura granoblástica irregular a poligonal. Bajo el microscopio la calcita granoblástica exhibe recristalización de borde de grano y ma-

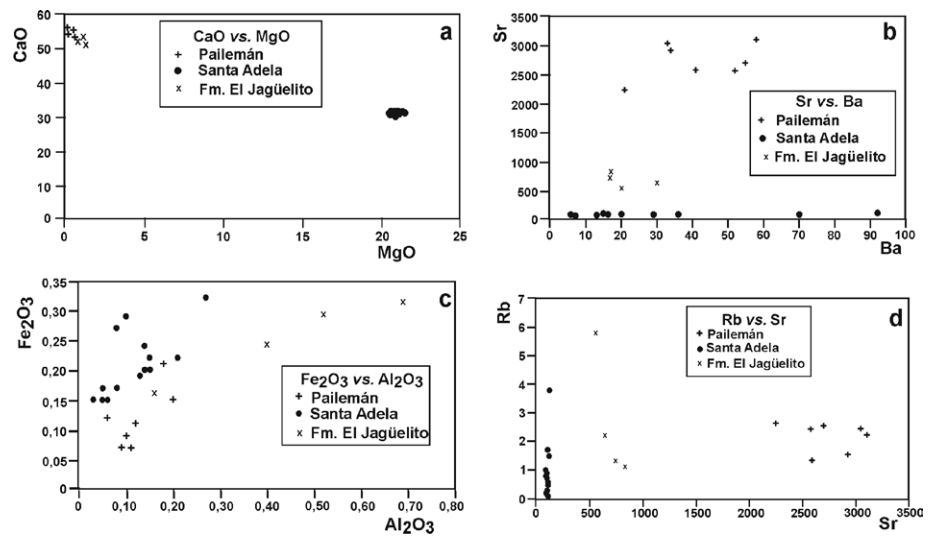
clas tipo I a III (según la clasificación de Paschier y Trouw 2005) que indican blastesis por encima de los 300° C. Acompañan escaso talco escamoso o en abanicos de fibras y abundante materia orgánica, tanto de hábito pulverulento y alineada marcando la laminación primaria relictica, como granular y agrupada en racimos de varios individuos.

La brucita está presente en todas las muestras con color gris y hábito fibroso radial, que reemplaza en forma pseudomórfica a un mineral ecuanter, cúbico a tabular corto de aristas romas, que recuerda la forma de la periclase o el diópsido. Dado el citado reemplazo, no es posible determinar bajo el microscopio petrográfico si se trata de alguna de estas dos especies minerales.

Finalmente, los carbonatos exhiben estilolitas de disolución por presión de tipo “diente de perro”, en cuyos planos han quedado en forma relictica algunos argilominerales insolubles (escasa illita y caolinita según DRX) y la materia orgánica. Acompañan vetillas de calcita con textura tipo blocosa.

**Clastos de caliza en la Formación El Jagüelito:** Los clastos calcáreos son bloques sub-redondeados, castaño claro a castaño grisáceos, de forma ovoidal con 35-40 cm de largo por 20-25 cm de ancho y que están dispersos entre los clastos mayormente ígneos, tanto volcánicos como plutónicos, de un meta-conglomerado. Los clastos calcáreos son de grano muy fino a micríticos, están finamente laminados y exhiben restos de arqueociátidos descriptos por González *et al.* (2011a, 2013).

El carbonato exclusivo de los clastos es la calcita. En aquellos menos afectados por el metamorfismo y la deformación, la caliza aún exhibe su textura bioclástica de restos de arqueociátidos rodeados de una matriz esparítica y abundante materia orgánica no transformada en grafito. La matriz está parcialmente recrystalizada a un agregado calcítico granoblástico irregular a poligonal y de grano muy fino. En las muestras SG-2009-1 A y SG-2009-2 los carbonatos están recrystalizados a un agregado granoblástico irregular a poligonal, con granos inequigranulares.



**Figura 2:** Diagramas geoquímicos que caracterizan los calcáreos estudiados. Véase detalles en el texto.

Además como efecto de la carga litostática, exhiben estilolitas de disolución por presión.

La matriz de todas las muestras exhibe algunos clastos silicoclásticos de cuarzo y plagioclasa, que en el caso de SG-2009-3 forman una lámina de 1 mm de ancho, donde también aparece escasa albita. Otros detalles petrográficos sobre el metamorfismo y deformación del metaconglomerado se exhiben en González *et al.* (2011a).

**Comparación del metamorfismo:** Las asociaciones minerales de los mármoles en las tres localidades analizadas son las siguientes: dolomita + talco + tremolita-actinolita ± calcita ± flogopita (± diópsido?) en el Complejo Mina Gonzalito; calcita + talco ± dolomita (± periclase? o ± diópsido?) en el mármol Pailemán y finalmente sólo calcita en los clastos del metaconglomerado de la Formación El Jagüelito. De las tres asociaciones, sólo aquella del Complejo Mina Gonzalito es útil para indicar por sí misma el grado metamórfico alcanzado por los mármoles, mientras que las otras dos no son suficientemente robustas para ello. La combinación de estas asociaciones minerales con aquellas de las meta-pelitas de los respectivos encajonantes indican que los mármoles del Complejo Mina Gonzalito alcanzaron un grado metamórfico en facies anfibolita alta (zona de tremolita-actinolita alta y posiblemente la zona de diópsido, según la

zonación de Bucher y Grapes (2011), consistente con la aparición de granate, sillimanita y feldespato potásico en las meta-pelitas (Dalla Salda *et al.* 2003, González *et al.* 2008b).

El grado metamórfico del mármol Pailemán es de facies anfibolita epidótica (zona de talco-flogopita), algo más bajo respecto de aquel del Complejo Mina Gonzalito. Las meta-pelitas de la caja de estos mármoles tienen la asociación biotita-granate, que es consistente con dicha facies. La brucita que es pseudomórfica según periclase o diópsido indica un estadio de metamorfismo retrógrado con infiltración de fluidos. Sin embargo, la blastesis de periclase o diópsido previo a este estadio sugiere que se habría alcanzado un clímax metamórfico que quizá fue equivalente a aquel del Complejo Mina Gonzalito.

Finalmente, las calizas de la Formación El Jagüelito son las de menor grado metamórfico en facies esquistos verdes grado clorita, tal como registran las filitas y la matriz del meta-conglomerado que exhiben clorita + sericita + cuarzo (González *et al.* 2011a).

### Geoquímica de roca total

Para la caracterización de los calcáreos estudiados se confeccionaron varios diagramas de dispersión (Fig. 2). El diagrama CaO vs MgO (Fig. 2a) muestra la disposición separada de los calcáreos calcíticos

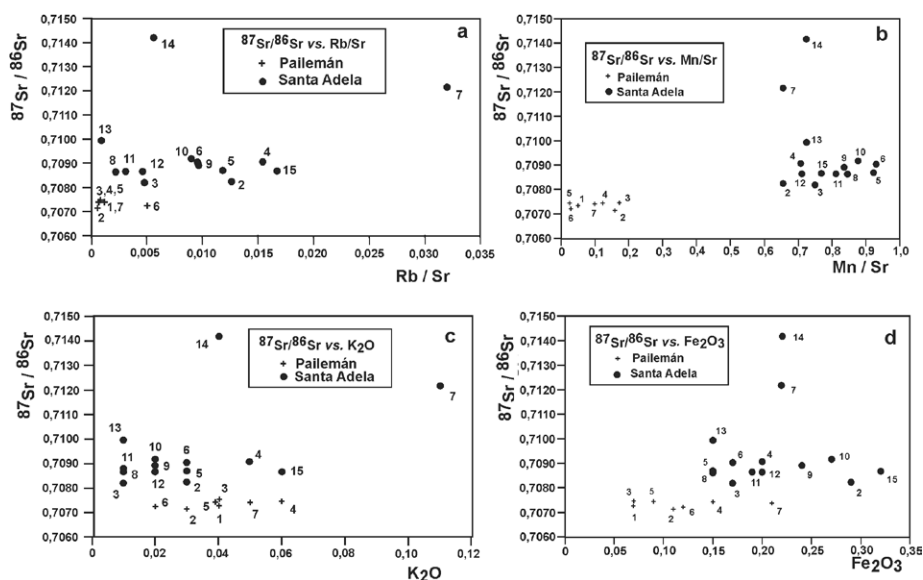


Figura 3: Diagramas evaluadores de los análisis isotópicos de estroncio. Véase detalles en el texto.

CUADRO 2. Composición isotópica de estroncio de los calcáreos estudiados.

Cig	Muestra	Material	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Error ( $2\sigma$ )
1462	PL-1	Mármol calcítico	0,707355	0,000061
1463	PL-2	Mármol calcítico	0,707145	0,000054
1464	PL-3	Mármol calcítico	0,707455	0,000041
1465	PL-4	Mármol calcítico	0,707450	0,000052
1466	PL-5	Mármol calcítico	0,707445	0,000058
1467	PL-6	Mármol calcítico	0,707228	0,000049
1468	PL-7	Mármol calcítico	0,707397	0,000046
1473	SAD-1	Mármol dolomítico	0,708490	0,000073
1474	SAD-2	Mármol dolomítico	0,708272	0,000076
1475	SAD-3	Mármol dolomítico	0,708220	0,000055
1476	SAD-4	Mármol dolomítico	0,709094	0,000063
1477	SAD-5	Mármol dolomítico	0,708724	0,000060
1478 E	SAD-6 (D)	Mármol dolomítico-calcítico	0,710534	0,000085
1489	SAD-6 (C)	Mármol dolomítico-calcítico	0,709066	0,000066
1479 E	SAD-7	Mármol dolomítico	0,712193	0,000072
1480	SAD-8	Mármol dolomítico	0,708664	0,000060
1481	SAD-9	Mármol dolomítico	0,708944	0,000061
1483	SAD-10	Mármol dolomítico	0,709201	0,000062
1484	SAD-11 (D)	Mármol dolomítico-calcítico	0,708768	0,000057
1490	SAD-11 (C)	Mármol dolomítico-calcítico	0,708674	0,000047
1485	SAD-12	Mármol dolomítico	0,708675	0,000062
1486 E	SAD-13	Mármol dolomítico	0,709963	0,000063
1487 E	SAD-14	Mármol dolomítico	0,714207	0,000058
1488 E	SAD-15 (D)	Mármol dolomítico-calcítico	0,720440	0,000066
1491	SAD-15 (C)	Mármol dolomítico-calcítico	0,708701	0,000066
1469	SG-2009-1A	Caliza	0,710765	0,000053
1470	SG-2009-1B	Caliza	0,710569	0,000059
1471	SG-2009-2	Caliza	0,710482	0,000055
1472 E	SG-2009-3	Caliza	0,711874	0,000047
1482	S-10	Patrón intralaboratorio CIG	1,290770	0,000047

CIG: N° de laboratorio; E: excluido de los cálculos; D: dolomita; C: calcita.

Relaciones isotópicas  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  normalizadas para  $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0,1194$ .

Valor medio NBS-987 durante los análisis  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,710256 \pm 0,000063$ .

de Pailemán (PL) y los clastos del meta-conglomerado de la Formación El Jagü-

lito (SG2009), respecto de los calcáreos dolomíticos de la cantera Santa Adela (es-

tancia La Auricana, SAD). En el diagrama Sr vs. Ba (Fig. 2b) se aprecia claramente que los mármoles de Pailemán (PL) tienen alto contenido de Sr y Ba y grafican por separado de los mármoles dolomíticos de estancia La Auricana (SAD) y de los calcáreos del meta-conglomerado (SG), que tienen contenidos menores de ambos elementos. En el diagrama  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  vs.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Fig. 2c) se destaca para los calcáreos de Pailemán (PL) el bajo contenido de Fe y Al, que los caracteriza como los de mayor pureza, al tiempo que los mármoles de la cantera Santa Adela muestran un progresivo incremento de ambos elementos, solo superado por los clastos de caliza (SG). De la representación en el diagrama Rb vs Sr (Fig. 2d), interesa destacar la favorable composición de los calcáreos Pailemán (PL) por los altos contenidos de Sr y bajos de Rb, y el bajo contenido de Sr en los mármoles dolomíticos de la estancia La Auricana (SAD).

Los análisis químicos de roca total de los calcáreos también constituyen una herramienta adecuada para seleccionar y/o evaluar los resultados de la composición isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ . Los parámetros de selección establecidos por Jacobsen y Kaufman (1999) en la elaboración de la curva estándar de evolución de la relación  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  durante el Neoproterozoico, consisten en  $\text{Mn}/\text{Sr} < 2$ ,  $\text{Rb}/\text{Sr} < 0,005$  y concentración de Sr entre 150 y 2500 ppm. Por otra parte, los trabajos de Melezhik *et al.* (2001, 2008) indican esencialmente que en mármoles pueden obtenerse relaciones isotópicas primarias de estroncio cuando la relación  $\text{Mn}/\text{Sr}$  es menor de 0,2. Los calcáreos de Pailemán (PL) satisfacen ampliamente los requisitos, con  $\text{Mn}/\text{Sr}$  entre 0,03 y 0,17,  $\text{Rb}/\text{Sr}$  entre 0,005 y 0,0005 y Sr entre 2245 y 3102 ppm. Las muestras de cantera Santa Adela (SAD) se ajustan menos a esos requerimientos, con  $\text{Mn}/\text{Sr}$  entre 0,66 y 0,93,  $\text{Rb}/\text{Sr}$  que es cumplido por SAD-3, 8, 11, 12, 13 y 14, mientras las restantes muestras tienen valores algo más elevados, entre 0,009 y 0,032 y concentración de Sr relativamente baja, entre 84 y 119 ppm. Finalmente, los clastos de caliza (SG2009) tienen relación  $\text{Mn}/\text{Sr}$  rela-

vamente elevada (1,8 a 5,3), Rb/Sr satisfactoria (0,001 a 0,003) excepto para la muestra SG2009-1A que acusa un valor de 0,01 y contenidos de Sr aceptables, entre 551 y 829 ppm.

Los diagramas bivariantes utilizados permiten eventualmente evaluar si las relaciones isotópicas medidas son primarias o resultaron afectadas por procesos post-depositacionales diagenéticos o metamórficos. Se ha graficado solamente las muestras de Pailemán (PL) y cantera Santa Adela (SAD), por ser las de mayor interés para el presente estudio (Fig. 3).

Se incluye el cotejo de la relación  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  vs. Rb/Sr (Fig. 3a),  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  vs. Mn/Sr (Fig. 3b),  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  vs.  $\text{K}_2\text{O}$  (Fig. 3c) y  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  vs.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Fig. 3d). En los cálculos para obtener los valores medios de la relación  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  no se excluye ninguna muestra de Pailemán (PL), se excluyen 3 muestras de la cantera Santa Adela (SAD-7, 13 y 14) y una de Sierra Grande (SG2009-3). No obstante, cabe mencionar que solo en los gráficos  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  vs. Rb/Sr y  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  vs.  $\text{K}_2\text{O}$  queda justificada la eliminación de la muestra SAD-7 y que en ninguno de los diagramas hay evidencias para excluir las muestras SAD-13 y 14.

### Análisis isotópico de estroncio

Los valores de la relación  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en 30 análisis espectrométricos constan en el cuadro 2. El análisis del mismo es como sigue:

**Complejo Mina Gonzalito:** El análisis de dolomita fue realizado sobre las 15 muestras disponibles. Además, tres fueron analizadas en extracciones de estroncio de calcita. De los 15 datos proporcionados por análisis de dolomita, cinco fueron excluidos para la obtención del promedio (SAD-6, 7, 13, 14 y 15), por evidenciar desvíos importantes con relación a los 10 restantes, en todas ellas valores  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  altos y atribuibles a contaminación con  $^{87}\text{Sr}$  radiogénico. Se destaca que los datos excluidos se ubican en dos niveles "estratigráficos", aproximadamente a 5 m (SAD-6 y 7) y a 20 m (SAD-13, 14 y 15) de la base del perfil. El rango de valores de la relación  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  para las 10 muestras seleccionadas es de 0,708220-0,709201 y el

valor medio  $0,708705 \pm 0,000305$ .

En el análisis por calcita de tres muestras se obtuvo valores concordantes entre sí (0,708674 - 0,709066), con un valor promedio de la relación  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de  $0,708814 \pm 0,000179$ .

El resultado obtenido sobre dolomita, comparable dentro del error analítico respecto al obtenido sobre calcita, permite considerar válidos a los 13 valores seleccionados, tanto obtenidos en dolomita como en calcita. El valor medio de la relación  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  es de  $0,708730 \pm 0,000285$ .

**Mármol Pailemán:** La composición de los mármoles de Pailemán es predominantemente calcítica. Se obtuvo la composición isotópica de las siete muestras procesadas, con datos que resultan coherentes entre sí. El rango de valores de la relación  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  es de  $0,707145 - 0,707455$  con un promedio de  $0,707354 \pm 0,000113$ .

**Formación El Jagüelito:** En los clastos calcáreos del metaconglomerado se analizaron cuatro muestras de composición calcítica, pero una fue excluida de los cálculos (SG2009-3) por apartarse notoriamente del entorno del valor obtenido en las restantes. El promedio de la relación  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en las tres muestras seleccionadas es de  $0,710605 \pm 0,000118$ .

## INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS DATOS

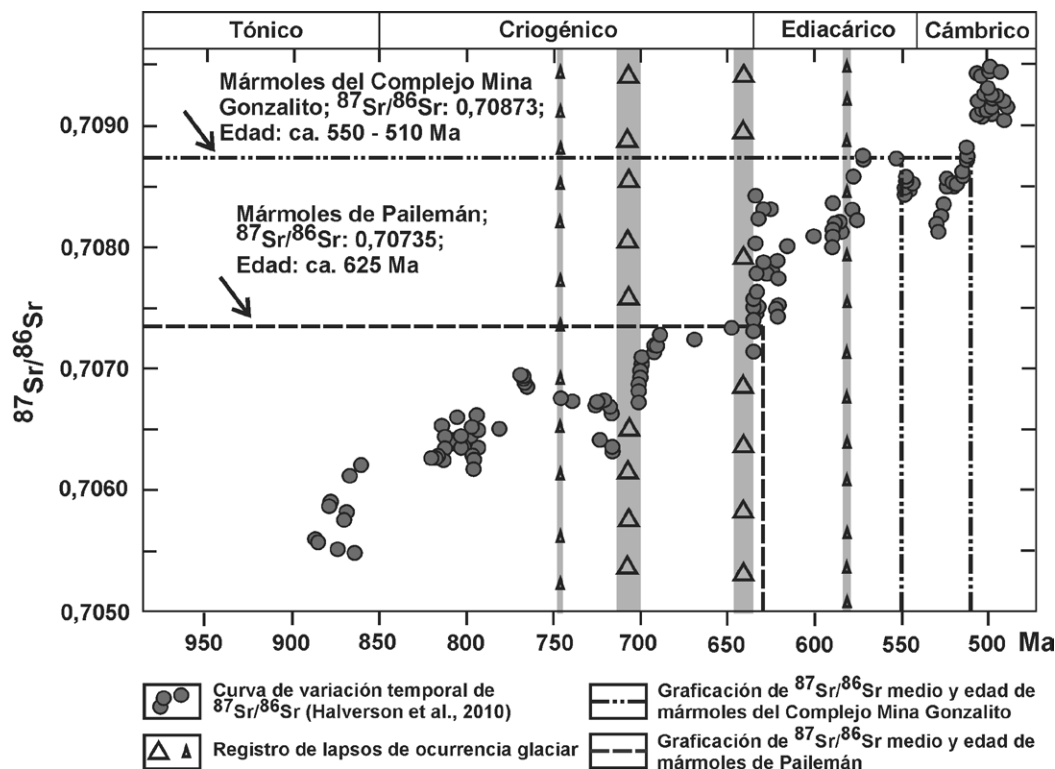
Los tres conjuntos de calcáreos estudiados tienen composición distintiva de isótopos de estroncio, a saber: a) Mármol Pailemán,  $0,707354 \pm 0,000113$ ; b) Complejo Mina Gonzalito,  $0,708730 \pm 0,000285$ ; c) Formación El Jagüelito,  $0,710605 \pm 0,000118$ . El entorno estratigráfico en que se ubican las unidades de basamento del Noreste Patagónico y la participación de rocas calcáreas en su composición, hacen propicia la aplicación del estudio de isótopos de estroncio para aportar sobre la edad geológica de las mismas. En efecto, la variación de los valores  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en las aguas marinas es una herramienta para el análisis de variaciones climáticas y tectónicas, en lapsos mayores que  $10^7$  años. Específicamente, en el Neoproterozoico y Cámbrico, la curva es-

tandar muestra un ascenso desde  $\sim 0,7055$  hasta  $\sim 0,7095$ , con fluctuaciones del orden de 0,0005 dentro de esa tendencia general (Halverson *et al.* 2010 y referencias). Además, las contribuciones de Melezhik *et al.* (2001, 2008) en mármoles de los Caledónides noruegos y del cinturón Pan-Africano de Mozambique, son ejemplos de la posibilidad de utilizar la "estratigrafía isotópica" en secuencias carbonáticas afectadas por metamorfismo, incluso hasta en facies anfíbolita.

De los tres conjuntos aquí estudiados, la secuencia de Pailemán es la que tiene menos controles estratigráficos para estimar su edad. La edad del metamorfismo regional en facies anfíbolita es de  $472 \pm 5$  Ma y acota la edad mínima de su protolito (Pankhurst *et al.* 2006, González *et al.* 2008a). El valor medio  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  0,7074 de los mármoles señala como posible una edad de sedimentación de ca. 625 Ma, esto es del Ediacárico temprano (Tabla de la IUGS, Cohen *et al.* 2013, Fig. 4).

La edad mínima de los protolitos meta-sedimentarios del Complejo Mina Gonzalito es mayor que  $492 \pm 6$  Ma, según la edad de cristalización magmática de un granito pre-orogénico intrusivo en el complejo (González *et al.* 2008b, Varela *et al.* 2011). Cuenta también la moda de menor edad en 535-540 Ma de circones detríticos de un paragneis, que asegura la menor edad del protolito original respecto a ese valor (Pankhurst *et al.* 2006). Se agrega que la importancia relativa de esa moda en el total de circones datados en esa muestra, sugiere proveniencia desde un cercano arco volcánico activo (González *et al.* 2011b) y en tal caso ser próxima a la edad de sedimentación (Pankhurst *et al.* 2006). El valor medio  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de los mármoles del Complejo Mina Gonzalito es de 0,7087, que en la curva global de evolución tiene intersección tanto en el Ediacárico tardío ( $\sim 550$  Ma) como en el Cámbrico medio ( $\sim 510$  Ma). Con los datos U-Pb disponibles (Pankhurst *et al.* 2006, Greco *et al.* 2014) sumados a los de isótopos de Sr aquí aportados, queda por lo tanto delimitada la probable edad de sedimentación del protolito meta-sedimentario del Complejo Mina Gonzalito en el lapso 550-510





**Figura 4:** Gráfica de los resultados obtenidos para los mármoles de Pailemán y Complejo Mina Gonzalito en la curva de variación temporal de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en aguas marinas del Neoproterozoico, según Halverson *et al.* (2010).

Ma, con mayor afinidad a un valor cercano a 535-540 Ma.

La edad estratigráfica del meta-conglomerado con clastos calcáreos de la Formación El Jagüelito es Cámbrico Temprano medio (Atdabaniano-Botomiano), según su contenido fosilífero (González *et al.* 2011a, 2013) y la moda de 530 Ma en sus circones detríticos (Naipauer *et al.* 2010). Anteriormente fue propuesto como mayor que 472 Ma, que es la edad de cristalización magmática del plutón granítico El Molino, que intruye regionalmente a la sucesión meta-sedimentaria que contiene al conglomerado (González *et al.* 2008a). El valor medio  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de los calcáreos es alto (0,7106) y probablemente está influenciado por el aporte de estroncio radiogénico proveniente de los feldespatos de la matriz calcítica de los clastos -identificados con los estudios petrográficos (ver arriba)- y/o aquellos de la matriz del meta-conglomerado (González *et al.* 2011a). El valor alto de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de estas calizas está por encima de los valores de la curva secular y no aporta precisiones adicionales sobre la edad de deposición de la Formación El Jagüelito,

ni sobre la proveniencia de los clastos calcáreos.

El intervalo estratigráfico que representan las rocas estudiadas, Neoproterozoico superior a Cámbrico, involucra acontecimientos paleogeográficos y tectónicos de importancia para el sudoeste de Gondwana. Las unidades estratigráficas conocidas para ese tiempo, en territorio argentino y extensión hacia Uruguay y sur de Brasil, incluyen al Grupo Lerma, en el noroeste (Toselli *et al.* 2005, López de Azarevich *et al.* 2010), Metamorfita Tambillo, Formación Difunta Correa y Grupo Cauce, en las Sierras Pampeanas Occidentales de San Juan y La Rioja (Varela *et al.* 2001, Galindo *et al.* 2004), Grupo Sierras Bayas-Formación Cerro Negro en Tandilia (Kawashita *et al.* 1999a, Gómez Peral *et al.* 2007) y Grupos Arroyo del Soldado y Corumbá, en Uruguay y Brasil respectivamente (Kawashita *et al.* 1999b, Gaucher *et al.* 2003, 2004, 2007, Boggiani *et al.* 2010). Tentativamente y sobre la base del estudio de los isótopos de estroncio, puede efectuarse una comparación entre los mármoles y calizas del noreste patagónico con alguna de las unidades mencio-

nadas. Los mármoles de Pailemán serían contemporáneos con los mármoles y rocas calcosilicáticas de la Metamorfita Tambillo ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  0,7072-0,7075), con las metasedimentitas de la Formación Difunta Correa ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  0,7073-0,7074) y con las calizas negras de la Formación Loma Negra en los afloramientos de la cantera Loma Negra, Olavarría (valor medio de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  0,70712). Por su parte, las relaciones  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de los mármoles del Complejo Mina Gonzalito son de mayor afinidad con los calcáreos de la Formación Polanco del Grupo Arroyo del Soldado ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  0,7083-0,7085) y la Formación Tamengo del Grupo Corumbá ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  0,7084-0,7086). Estos últimos conjuntos tienen valores  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  algo más bajos que los del Grupo Cauce ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  0,7092-0,7094), asignados al Cámbrico Temprano tardío hasta Cámbrico Medio y en parte correlacionables con las calizas cámbricas de la Precordillera sanjuanina (Galindo *et al.* 2004, Naipauer *et al.* 2005, 2010).

En cuanto a los clastos de calizas del metaconglomerado de la Formación El Jagüelito, el valor  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  = 0,7106 es igual

al determinado en calcáreos cámbricos de la Formación Cerro Victoria (unidad superior del Grupo Arroyo del Soldado, Gaucher *et al.* 2007).

Cabe considerar también la conocida diferencia en lo que se refiere al ambiente geotectónico en que evolucionaron las unidades comparadas. Mayormente en los párrafos anteriores se ha cotejado los valores  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  obtenidos en los calcáreos del noreste Patagónico (Plataforma Patagónica), con los de unidades que forman parte de la Plataforma Sudamericana (excepto el Grupo Caucete), aunque la relación entre ambas plataformas es aún motivo de diferentes interpretaciones.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que el aporte de la química-estratigrafía, a través del estudio de isótopos de estroncio, es una herramienta útil para mejorar el ordenamiento estratigráfico del basamento metamórfico del noreste Patagónico.

La sucesión de esquistos y mármoles de Pailemán puede constituir una unidad diferenciable de la Formación El Jagüelito y del Complejo Mina Gonzalito. Sería la de mayor antigüedad conocida del norte Patagónico, aproximadamente 625 Ma (Ediacárico temprano).

Las opciones de edad para los mármoles del Complejo Mina Gonzalito, emergentes de la composición isotópica de estroncio, se ubican aproximadamente en el Ediacárico tardío o en el Cámbrico medio. La primera parece más posible, por las edades de circones detríticos de componentes clásticos que intercalan con los calcáreos, aunque no puede descartarse totalmente la opción de pertenencia al Cámbrico medio.

Es recomendable profundizar el estudio de los calcáreos por medio de determinaciones de isótopos de carbono y oxígeno.

## AGRADECIMIENTOS

A los colegas del Centro de Investigaciones Geológicas Jorge Maggi, Cecilia Genazzini y Pablo García por las determinaciones mineralógicas por DRX.

Agradecemos las recomendaciones efectuadas por el Dr. Koji Kawashita y al Centro de Pesquisas Geocronológicas (CPGeo) de la Universidad de San Pablo, por la espectrometría de masas. También nuestro agradecimiento a Valeria García, Dania Pascua y Héctor Campos por la colaboración durante los trabajos de campo. Las sugerencias y observaciones efectuadas por un árbitro anónimo y el Editor de la Revista contribuyeron a mejorar el escrito. Los trabajos fueron costeados con fondos provenientes de los Proyectos PIP-CONICET 112-200801-00119 y 112-200801-00647; UNLP 11/N653; FAPESP 05/58688-1 (Brasil) y PI-UNRN 40-A-125.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Basei, M.A.S., Varela, R., Sato, A.M., Siga Jr., O. y Llabrás, E.J. 2002. Geocronología sobre rocas del Complejo Yaminué, Macizo Norpatagónico, Río Negro, Argentina. 15° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 117-122, El Calafate.
- Basei, M.A.S., Varela, R., Passarelli, C.R., Siga Jr., O., Cingolani, C.A., Sato, A.M. y González, P. 2005. The crystalline basement in the north of Patagonia: isotopic ages and regional characteristics. *Gondwana* 12, Book of Abstracts: 61, Mendoza.
- Boggiani, P.C., Gaucher, C., Sial, A.N., Babinski, M., Simon, C.M., Riccomini, C., Ferreira, V.P. y Fairchild, T.R. 2010. Chemostratigraphy of the Tamengo Formation (Corumbá Group, Brazil): A contribution to the calibration of the Ediacaran carbon-isotope curve. *Precambrian Research* 182: 382-401.
- Bucher, K. y Grapes R. 2011. *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. 8° edition complete revision of Winkler's textbook. Springer Verlag, 428 p., Berlin.
- Busteros, A., Giacosa, R. y Lema, H. 1998. Hoja Geológica 4166-IV, Sierra Grande. Provincia de Río Negro. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 241, 75 p., Buenos Aires.
- Caminos, R. y Llabrás, E.J. 1984. El Basamento Cristalino. 9° Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 37-63, S.C. de Bariloche.
- Chernicoff, C. y Caminos, R. 1996. Estructura y metamorfismo del Complejo Yaminué, Macizo Nordpatagónico oriental, provincia de Río Negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 51: 107-118.
- Cohen, K., Finney, S. y Gibbard, P. 2013. Tabla Cronoestratigráfica Internacional. IUGS-Comisión Internacional de Estratigrafía. Versión en español, v 2013/01.
- Dalla Salda, L.H., Aragón, E., Benialgo, A. y Pezzotti, C. 2003. Una plataforma calcárea en el Complejo Mina Gonzalito, provincia de Río Negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 58: 209-217.
- Galindo, C., Casquet, C., Rapela, C., Pankhurst, R.J., Baldo, E. y Saavedra, J. 2004. Sr, C and O isotope geochemistry and stratigraphy of Precambrian and lower Paleozoic carbonate sequences from the Western Sierras Pampeanas of Argentina: tectonic implications. *Precambrian Research* 131: 55-71.
- Gaucher, C., Boggiani, P.C., Sprechmann, P., Sial, A.S. y Faichild, T. 2003. Integrated correlation of the Vendian to Cambrian Arroyo del Soldado and Corumbá Groups (Uruguay and Brazil), palaeogeographic, palaeoclimatic and palaeobiologic implications. *Precambrian Research* 120: 241-278.
- Gaucher, C., Sial, A.N., Blanco, G. y Sprechmann, P. 2004. Chemostratigraphy of the lower Arroyo del Soldado Group (Vendian, Uruguay) and palaeoclimatic implications. *Gondwana Research* 7: 715-730.
- Gaucher, C., Sial, A.N., Valdez Ferreira, P., Pimentel, M.M., Chiglin, L. y Sprechmann, P. 2007. Chemostratigraphy of the Cerro Victoria Formation (Lower Cambrian, Uruguay): Evidence for progressive climate stabilization across the Precambrian-Cambrian boundary. *Chemical Geology* 237: 28-46.
- Giacosa, R.E. 1987. Caracterización de un sector del basamento metamórfico-migmatítico en el extremo suroccidental del Macizo Nordpatagónico. Provincia de Río Negro, Argentina. 10° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 51-54, Tucumán.
- Giacosa, R.E. 2001. Zonas de cizalla frágil-dúctil neopaleozoicas en el nordeste de la Patagonia. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 56: 131-140.
- Giacosa, R. y Paredes, J. 2001. Estructura de las metamorfitas del Paleozoico temprano en el arroyo Salado. Macizo Norpatagónico, Río Negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 56: 141-149.

- Gómez Peral, L.E., Poiré, D.G., Strauss, H y Zimmermann, U. 2007. Chemostratigraphy and diagenetic constraints on Neoproterozoic carbonate successions from the Sierras Bayas Group, Tandilia System, Argentina. *Chemical Geology* 237: 109-128.
- González, P. 1994. Mapa geológico de la provincia de Río Negro. República Argentina. Escala 1:750.000 (Coord. F.E. Nullo y M. Franchi). Dirección Nacional del Servicio Geológico.
- González, P., Poiré, D. y Varela, R. 2001. Hallazgo de trazas fósiles en la Formación El Jagüelito y su relación con la edad de las metasedimentitas, Macizo Norpatagónico Oriental, Provincia de Río Negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 57: 35-44.
- González, P.D., Sato, A.M., Varela, R., Llambias, E., Naipauer, M., Basei, M., Campos, H. y Greco, G. 2008a. El Molino Pluton: a granite with regional metamorphism within El Jagüelito Formation, North Patagonian Massif. 6° South American Symposium on Isotope Geology, Short Papers: n° 41, 4 p., San Carlos de Bariloche.
- González, P.D., Varela, R., Sato, A.M., Llambias, E. y González, S. 2008b. Dos fajas estructurales distintas en el Complejo Mina Gonzalito (Río Negro). 17° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 847-848, S.S. de Jujuy.
- González, P.D., Tortello, S.E. y Damborenea, S.E. 2011a. Early Cambrian archaeocyathan limestone blocks in low-grade meta-conglomerate from El Jagüelito Formation (Sierra Grande, Río Negro, Argentina). *Geológica Acta* 9: 159-173.
- González, P.D., Sato, A.M., Naipauer, M., Varela, R., Llambias, E., Basei, M., Sato, K. y Sproesser, W. 2011b. Does Patagonia represent a missing piece detached from the Ross Orogen? *Gondwana* 14, Abstracts: 1 p., Río de Janeiro.
- González, P. D., Tortello, M., Damborenea, S., Naipauer, M., Sato, A.M. y Varela, R., 2013. Archaeocyaths from South America: review and a new record. *Geological Journal* 48: 114-125.
- González, M.R. 2009. Petrografía y edad  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de leucogranitos peraluminosos al oeste de Valcheta. Macizo Nordpatagónico (Río Negro). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 64: 285-294.
- Greco, G., González, S., Sato, A.M., González, P.D., Llambias, E. y Basei, M. 2014. Nueva datación en circones detríticos para el Complejo Mina Gonzalito, Provincia de Río Negro. 19° Congreso Geológico Argentino, Actas CD: S21-21, 2 p. Córdoba.
- Halverson, G.P., Wade, B.P., Hurtgen, M.T. y Barovich, K.M. 2010. Neoproterozoic chemostratigraphy. *Precambrian Research* 182: 337-350.
- Jacobsen, S.B. y Kaufman, A.J. 1999. The Sr, C and O isotopic evolution of Neoproterozoic seawater. *Chemical Geology* 161: 37-57.
- Kawashita, K., Varela, R., Cingolani, C., Soliani Jr., E., Linares, E., Valencio, S.A., Ramos, A.V. y Do Campo, M. 1999a. Geochronology and chemostratigraphy of "La Tinta" Neoproterozoic sedimentary rocks, Buenos Aires province, Argentina. 2° South American Symposium on Isotope Geology, Extended Abstracts: 403-407, Villa Carlos Paz.
- Kawashita, K., Gaucher, C., Sprechmann, P., Teixeira, W. y Victoria, R. 1999b. Preliminary chemostratigraphic insights on carbonate rocks from Nico Pérez Terrane (Uruguay). 2° South American Symposium on Isotope Geology, Extended Abstracts: 399-402, Carlos Paz.
- López de Azarevich, V., Santos, R., Omarini, R. y Azarevich, M. 2010. Isotopía de los carbonatos de la Formación Las Tienditas (Neoproterozoico-Cámbrico), NO argentino: implicancias de la dinámica de deposición. 7° South American Symposium on Isotope Geology, Extended Abstracts: 301-304, Brasilia.
- Melezhik, V.A., Gorokhov, I.M., Fallick, A.E. y Gjelle, S. 2001. Strontium and carbon isotope geochemistry applied to dating of carbonate sedimentation: an example from high-grade rocks of the Norwegian Caledonides. *Precambrian Research* 108: 267-292.
- Melezhik, V.A., Bingen, B., Fallick, A.E., Gorokhov, I.M., Kuznetsov, A.B., Sandstad, J.S., Solli, A., Bjerkgaard, T., Henderson, I., Boyd, R., Jamal, D. y Moniz, A. 2008. Isotope chemostratigraphy of marbles in northeastern Mozambique: Apparent depositional ages and tectonostratigraphic implications. *Precambrian Research* 162: 540-558.
- Naipauer, M., Gaucher, C. y Cingolani, C. 2005. Limestone-dolostone rhythmites in the Caucete Group, Sierra de Pie de Palo, Argentina. *Gondwana* 12, Abstract: 265, Mendoza.
- Naipauer, M., Sato, A.M., González, P.D., Chemale Jr., F., Varela, R., Llambias, E.J., Greco, G.A. y Dantas, E. 2010. Eopaleozoic Patagonia-East Antarctica connection: fossil and U-Pb evidence from El Jagüelito Formation. 7° South American Symposium on Isotope Geology, Extended Abstracts: 602-605, Brasilia.
- Pankhurst, R.J., Rapela, C.W., Fanning, C.M. y Márquez, M. 2006. Gondwanide continental collision and the origin of Patagonia. *Earth-Science Reviews* 76: 235-257.
- Passchier, C. y Trouw, R. 2005. *Microtectonics*. 2nd Edition Springer Verlag, 289 p., Berlin.
- Ramos, V.A. 1975. Geología del sector oriental del Macizo Nordpatagónico entre Aguada Capitán y la Mina Gonzalito, provincia de Río Negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 30: 274-285. Buenos Aires.
- Rosenman, H.L. 1972. Geología de la región del Arroyo los Berros (vertiente oriental de la Meseta de Somoncuro), Provincia de Río Negro, República Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 27: 117-137.
- Toselli, A.J., Aceñolaza, F.G., Sial, A.N., Rossi, J.N. y Ferreira, V.P. 2005. Los carbonatos de la Formación Puncoviscana s.l.: Correlación quimioestratigráfica e interpretación geológica. 16° Congreso Geológico Argentino, 2: 327-333, La Plata.
- Varela, R., Valencio, S., Ramos, A., Sato, K., González, P., Panarello, H. y Roverano, D. 2001. Isotopic Strontium, Carbon and Oxygen study on neoproterozoic marbles from Sierra de Umango, Andean Foreland, Argentina. 3° South American Symposium on Isotope Geology, Extended Abstracts: 450-453, Pucón.
- Varela, R., Basei, M.A.S., Cingolani, C.A., Siga Jr., O. y Passarelli, C.R. 2005. El Basamento Cristalino de los Andes norpatagónicos en Argentina: geocronología e interpretación tectónica. *Revista Geológica de Chile* 32: 167-182.
- Varela, R., Basei, M.A.S., González, P.D., Sato, A.M. y Sato, K. 2008. Granitoides famatinianos y gondwánicos en Sierra Grande, nuevas edades radiométricas método U-Pb. 17° Congreso Geológico Argentino, Actas: 914-915. San Salvador de Jujuy.
- Varela, R., González, P.D., Basei, M.A.S., Sato, K., Sato, A.M., Naipauer, M., García, V.A., González, S. y Greco, G. 2011. Edad del Complejo Mina Gonzalito: revisión y nuevos datos. 18° Congreso Geológico Argentino, Resúmenes: 2 p., Neuquén.

Recibido: 16 de septiembre, 2013

Aceptado: 16 de junio, 2014